

文章编号: 2096-1618(2020)01-0043-12

2017年8月东北地区一次雨雪降温过程的诊断

于佳舍, 巩远发

(成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225)

摘要:2017年8月27–31日中国东北地区出现了一次大范围降温过程,部分地区出现降水,其中漠河县、阿尔山市在28日均出现了初雪。为研究此次雨雪降温天气的形成原因,采用常规气象观测资料、ERA-Interim再分析资料、卫星云图资料,对大尺度环流背景、冷涡的发生发展机制和物理量场的配置进行诊断分析。结果表明:东北冷涡是这次雨雪降温过程的主要影响系统。干冷空气的入侵是冷涡形成和维持冷心结构的重要因素。在高纬冷空气随冷涡南下的过程中,有高空冷锋区逐渐向南移动,低层温度急剧下降是形成降雪的重要原因。水汽沿冷涡环流逆时针输送,大值区主要位于冷涡东侧,并随冷涡东移。冷涡降水取决于冷涡风场的结构变化特征,上升气流较强时,降水也较强。

关键词:气象学;天气诊断;东北冷涡;机制分析;雨雪降温

中图分类号:P458.1⁺21.1

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2020.01.008

0 引言

东北冷涡是指中国东北附近地区具有一定强度、能维持3~4 d,且有深厚冷空气的高空气旋性涡旋^[1],同时可引导高纬度地区的冷空气南下^[2]。东北冷涡在一年四季都会出现,尤其集中在夏季^[3]。东北冷涡的持续性活动是造成东北地区夏季低温的一个十分重要的因素,同时也对降水有重要的影响^[4]。李永生等^[5]发现东北冷涡是直接影响黑龙江省夏季气温的大尺度环流因子,并得到可用于预测黑龙江省夏季气温的关键影响指数和因子。李辑等^[6]指出东北冷涡、纬向环流和极涡面积的年代际变化可能是导致东北地区夏季气温年代际突变的原因之一。胡开喜等^[7]认为持续性冷涡的控制能造成东北局地四季的气温均明显偏低,并且在春季和夏季能导致局部降水的偏多。王宝书等^[8]分析了2010年7月吉林省一次强降水过程,发现500 hPa冷涡形势的建立和维持是强降水发生发展有利的大尺度环流背景,850 hPa伴随冷涡来的强冷空气南侵起到了触发强降水的作用。

强降温天气发生时,冷空气快速入侵,导致气温骤降,还经常引起低温冷害、雨雪、大风等灾害性天气,不仅会对人民的生活造成极大影响,也会直接对电力、交通、农业等行业的生产造成经济损失^[9]。很多学者深入研究了此类灾害性天气,董林等^[10]对2011年北京初雪的成因进行了分析,发现这次降雪是地面倒槽、东

风回流和高空短波槽共同作用产生的;李晓霞等^[11]分析了2014年甘肃一次大范围雨雪降温天气过程,研究表明,横槽转竖引导冷空气南下配合切变线、地面冷锋等系统引发了此次天气过程;杨贵名等^[12]认为“低温雨雪冰冻”天气持续的主要原因是冷暖气团的长时间对峙。许彤等^[13]分析了沈阳桃仙机场出现的2次雷雨转雨夹雪天气,认为可以用850 hPa温度场上的0℃线经过本场作为降水性质发生变化的判定依据。

2017年8月27–31日出现了一次东北冷涡活动过程,受该冷涡影响,8月27–31日东北地区出现了一次大范围降温过程,部分地区出现降水天气,28日黑龙江省漠河县与内蒙古阿尔山市均出现了当年的首场降雪,同时也分别是自1957年、1952年有气象资料以来首次在8月份出现降雪天气,分别较2016年首场降雪提前了37天和30天。两地在8月过早地出现降雪天气,历史罕见,均刷新了当地的历史记录。东北冷涡是这次东北地区发生降温降水天气的主要影响系统,因此对冷涡的发生发展机制分析有利于对此次雨雪降温过程的研究。

本文采用ERA-Interim 0.5°×0.5°一天4次的再分析资料、常规气象观测资料、FY-2F卫星资料,诊断分析了影响此次过程的大尺度环流背景、冷涡的发生发展机制以及物理量场的配置,研究此次雨雪降温天气的形成原因,为今后预报该类低温雨雪天气提供一定的帮助和参考,有利于加强东北冷涡影响下的降水和低温冷害等极端天气过程的预警和监测,为东北地区的人民生活 and 农业生产提供更有力的气象保障。

收稿日期:2019-04-28

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划资助项目(91537214);
国家自然科学基金资助项目(41775079,41275080)

1 天气过程特征

受东北冷涡影响,2017 年 8 月 27-31 日(北京时,下同)中国东北地区出现了一次从西至东的大范围降温过程(图 1),27 日 24 h 负变温区主要出现在东北地区的西部,28 日 24 h 负变温覆盖了东北大部分地区,且西部负值增大,29 日 24 h 负变温区主要出现在东北中部和东部,且东部负值大于中部,30、31 日的 24 h 负变温逐渐减弱。东北部分地区出现降水天气,降水量分布如图 2 所示,降水主要分布在东北地区的东部和北部,其中北部一直维持少量的降水,东部降水主要出现在 27 日 20 时-28 日 20 时,黑龙江省漠河县(122.5 °E、53.5 °N)在 28 日 02 时至 30 日 07 时出现

了一次历史同期罕见的低温雨雪天气过程,28 日上午和 29 日上午出现降雪,其余时间为降雨,较强时段出现在 29 日,过程降水量 39.8 mm,逐小时降水量如图 3 所示,漠河县 26-31 日的日平均、最高和最低气温如表 1 所示,气温整体为先降低再升高的变化趋势,28、29 日为低值时段,逐小时气温变化如图 4(a)所示,漠河县在 28 日和 29 日上午气温明显降低,且接近 0 °C,为降雪创造了条件。内蒙古阿尔山市(120 °E、47 °N)在 28 日上午出现降雪,降水量较少,阿尔山市 26-31 日的日平均、最高和最低气温如表 2 所示,气温整体在 28 日较低,在 30、31 日最低气温出现负值,逐小时气温变化如图 4(b)所示,阿尔山市在 28 日上午气温明显降低,接近 0 °C。

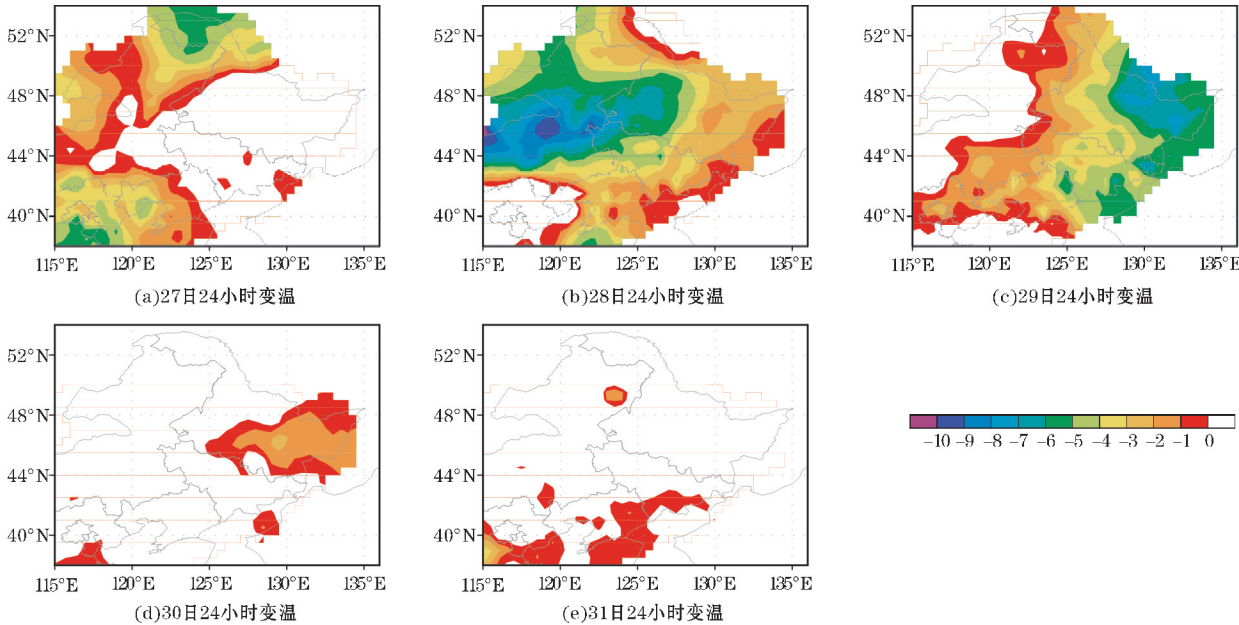


图 1 东北地区 2017 年 8 月 27-31 日的逐日平均气温 24 h 变温

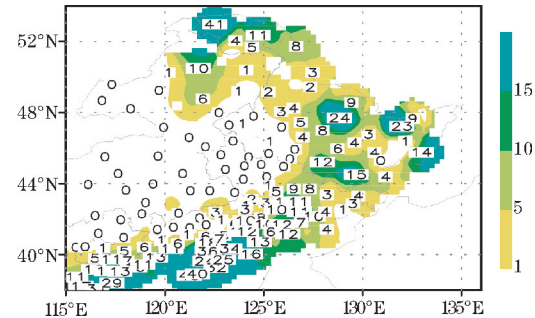


图 2 2017 年 8 月 27 日 20 时-30 日 20 时东北地区降水量分布

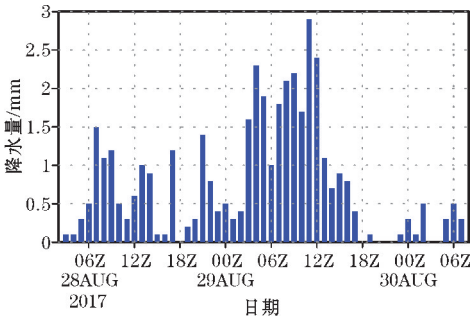


图 3 漠河县 2017 年 8 月 28-30 日逐小时降水量变化

表 1 漠河县 26-31 日的日平均、最高和最低气温

	26 日	27 日	28 日	29 日	30 日	31 日
平均气温	11.1	6.3	2.6	3.9	10.0	11.7
最高气温	17.5	12.2	6.8	5.6	17.1	20.2
最低气温	9.3	2.9	0.5	0.1	5.3	2.3

表 2 阿尔山市 26–31 日的日平均、最高和最低气温							℃
阿尔山	26 日	27 日	28 日	29 日	30 日	31 日	
平均气温	12.6	12.9	4.9	6.1	6.9	9.0	
最高气温	20.1	16.5	8.7	11.2	15.2	18.9	
最低气温	3.4	6.9	0.8	1.0	−1.7	−0.6	

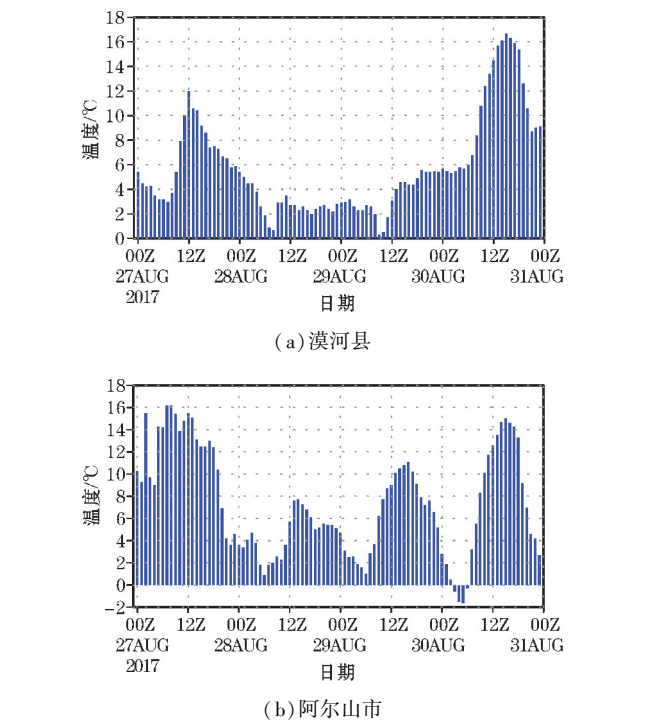


图 4 漠河县、阿尔山市 2017 年 8 月 27–30 日逐小时气温变化

2 大尺度环流背景及风场

2017 年 8 月 27–31 日出现了一次东北冷涡活动过程,其移动路径如图 5 所示。冷涡在位置变化上整体呈东移的趋势,29 日 14 时,冷涡明显西退,之后又继续东移,在强度变化上,整体呈由弱变强,之后又转弱的趋势,最强值出现在 29 日 08 时。500 hPa 天气图上,中西伯利亚北部有一个深厚的低压逐渐分裂出一个小的闭合低压,该闭合低压向东南方向移动,27 日 20 时已移入孙力等^[14]定义的东北冷涡范围内。此时东亚中高纬呈“两脊一槽”型,冷涡约位于 118°E、54°N,中心值 5422 gpm,温度槽落后于高度槽,温压场有较强的斜压性,槽将发展并快速东移,同时引导气流向 SE 方向移动,冷涡处于发展阶段,西部高压脊较强,约位于 80°E,东部弱脊位于 140°E 附近,阻塞形势逐渐建立,850 hPa 高空,冷涡外围的西南气流较强,中心最大风速 ≥ 20 m/s,对应 27 日 20 时–28 日 08 时东北东部的降水量较大。漠河、阿尔山分别位于冷涡外围的偏东气流和西北气流中,漠河风速较小,阿尔山的风速 ≥ 12 m/s。28 日 08 时(图 6a),500 hPa 高空,冷涡

向东南方向移动,约位于 123.5°E、52°N,中心值加强为 5363 gpm,对应冷中心 -31 ℃,此时高空槽前等高线疏散,槽后等高线密集,槽将发展并加深,上游高脊的稳定有利于高纬冷空气沿槽后西北气流南下,不断为冷涡补充冷空气。冷空气南下致使东北大部分地区气温明显降低,850 hPa 高空(图 6b),冷涡外围最大风速达 22 m/s 位于其西北位相,漠河转为冷涡后部的偏北气流,风速加强为 ≥ 14 m/s,阿尔山仍为西北气流且风速加强为 ≥ 16 m/s;29 日 08 时,500 hPa 高空,冷涡东移至 128°E、51°N 附近,中心值加强为 5324 gpm,对应冷中心 -29 ℃,

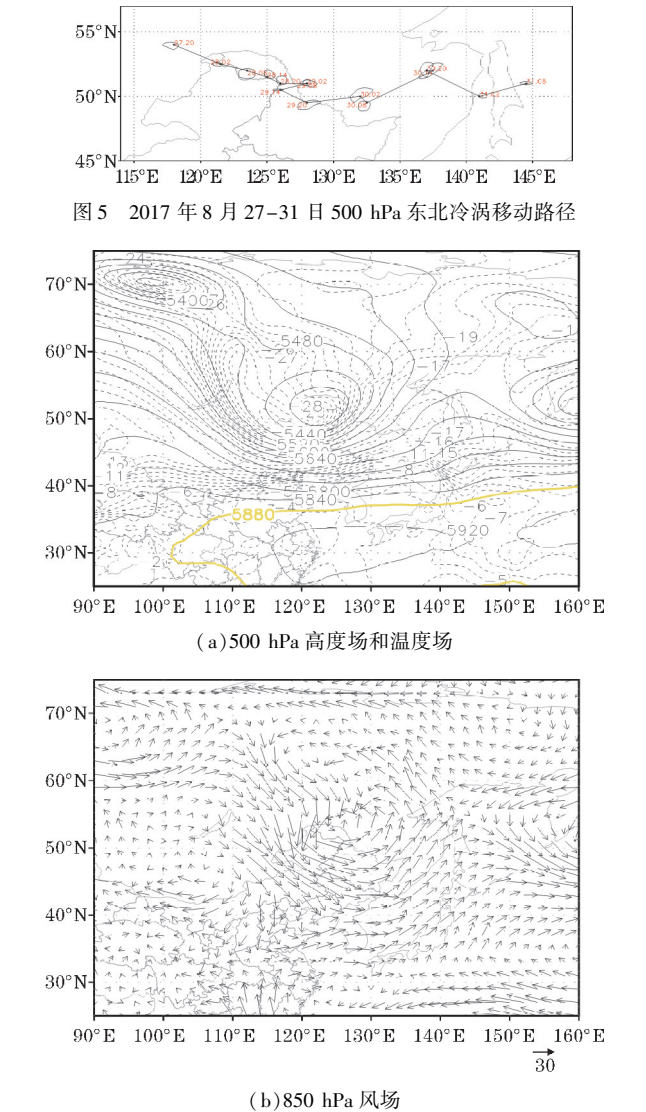


图 6 2017 年 8 月 28 日 08 时 500 hPa 高度场
和温度场叠加图及 850 hPa 风场

温度槽与高度槽基本重合,冷涡处于成熟阶段,冷涡西侧盛行偏北气流,冷空气不断补充南下,同时鄂霍次克海阻塞高压的阻挡,使冷涡在东北地区有较长时间的维持和发展,东北大部分地区的气温持续偏低,850 hPa高空,最大风速中心增长至24 m/s仍位于冷涡西北部,漠河、阿尔山仍位于冷涡外围的偏北气流和西北气流中,且风速分别加强为 ≥ 22 m/s和 ≥ 18 m/s;30日14时,500 hPa高空,冷涡东移至137.5°E、52°N附近,中心值减弱为5385 gpm,此时高空槽前等高线较密集,槽后等高线较疏散,冷涡逐渐减弱填塞。随着冷涡的减弱东移,东北地区的温度逐渐回暖。

3 冷涡发生发展的机制分析

3.1 冷涡发生、发展的热力动力条件

冷涡是一个正涡度系统,分析各时刻的涡度垂直剖面(图略),发现最大涡度中心位于高层500~300 hPa。在对流层高层400 hPa(图略),冷涡发展阶段,最大正涡度带位于冷涡的西北侧,沿逆时针方向传播到冷涡的底部,随着冷涡发展到成熟期,最大正涡度中心基本与冷涡中心重合,至减弱期,冷涡中心涡度减弱,最大正涡度位于冷涡的南侧。中层600 hPa(图略)的涡度分布与高层400 hPa相似,但正涡度中心值偏小。在低层850 hPa(图略),涡度中心与冷涡中心基本重合,且涡度的分布较为零散。

分析各时刻过冷涡中心的温度平流剖面(图7),发现,冷涡发展阶段(图7a、b,中心位置121.5°E、

52.5°N),冷平流主要位于冷涡的西侧高层至南侧低层,暖平流则主要位于冷涡的南侧至东侧高层,在冷涡的发展过程中,冷暖平流呈气旋式旋转。至冷涡成熟期(图7c、d,中心位置128°E、51°N),冷涡的南侧高层和东侧低层也出现了冷平流,冷涡的北侧整层、西侧中层和南侧低层也出现了暖平流。冷涡减弱期(图7e、f,中心位置137°E、52°N),冷暖平流在各方向、各层次上的分布则较为散乱。分析各时刻过冷涡中心的涡度平流剖面(图8),冷涡发展阶段(图8a),冷涡中心为负涡度平流,外围为正涡度平流,从低层到高层向西南倾斜,强度较弱。随着冷涡的发展,冷涡东侧的正涡度平流增强,28日20时~29日14时(图8b、c,中心位置分别为126°E、51°N和126°E、50.5°N),冷涡东部出现弱的负涡度平流,逐渐增强且向高层发展,29日14时,冷涡明显西退。29日20时(图8d,中心位置128°E、49.5°N),冷涡东部又转为正涡度平流,冷涡继续东移。当冷涡东部的正涡度平流减弱或出现负涡度平流时,冷涡东移缓慢或西退,当冷涡东部的正涡度平流增强时,冷涡将东移。

由47°N~56°N温度平流和涡度平流的区域平均时间演变(图略)可知,冷涡发展至成熟期,低层冷涡槽前有较强的冷平流,成熟至减弱期,槽前转为暖平流或较弱的冷平流,中高层变化与低层相似,只是冷暖平流强度更强。850 hPa冷涡主要为弱的负涡度平流,中高层槽前主要为正涡度平流,并随高度增加,发展期较强。可见,冷平流为促进低层冷涡发展的主要因子,而中高层槽前的正涡度平流对冷涡的发展有着重要作用。

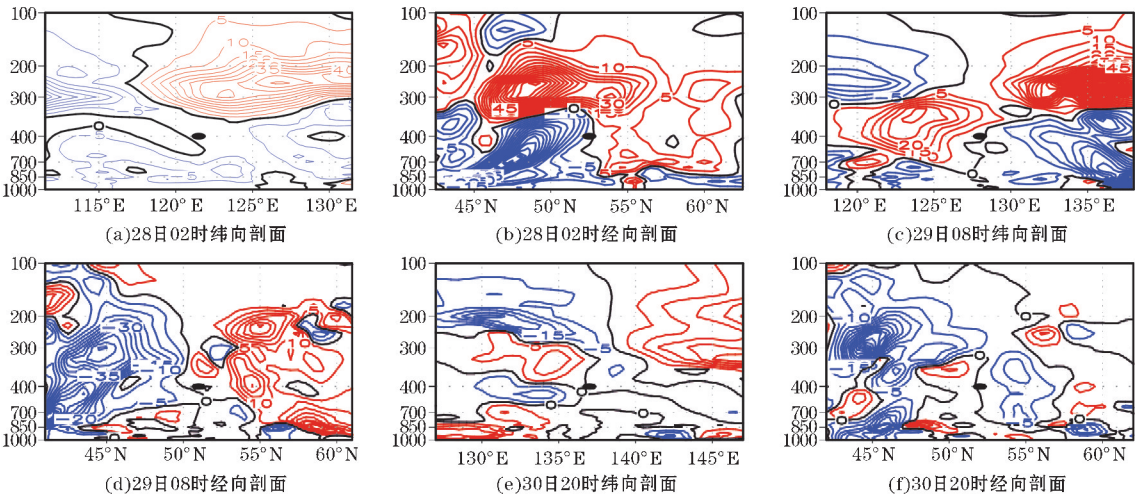


图7 2017年8月28日02时、29日08时、30日20时过冷涡中心的温度平流剖面(黑圆点为冷涡500 hPa中心位置,下同)

3.2 冷涡发展的干侵入机制

3.2.1 等熵位涡

绝热无摩擦大气有沿着等熵面做二维运动的趋

势,Hoskins等^[15]在绝热情况下,等熵面有可能更好地反映气流的三维运动特征,等熵位涡在绝热无摩擦大气中是守恒的,等熵面上的高位涡与气旋性环流相对应,低位涡与反气旋性环流相对应,分布一般为高层大

于低层,高纬大于低纬^[16]。吴迪等^[17]分析了干侵入对一次东北冷涡过程的作用,认为干侵入导致冷涡中心的绝对涡度增加,冷涡发展加强,干侵入作用是促进

冷涡发生发展的动力条件之一,而干侵入对冷涡的作用及其活动特征也可以从等熵面上各个要素场的变化中反映出来。

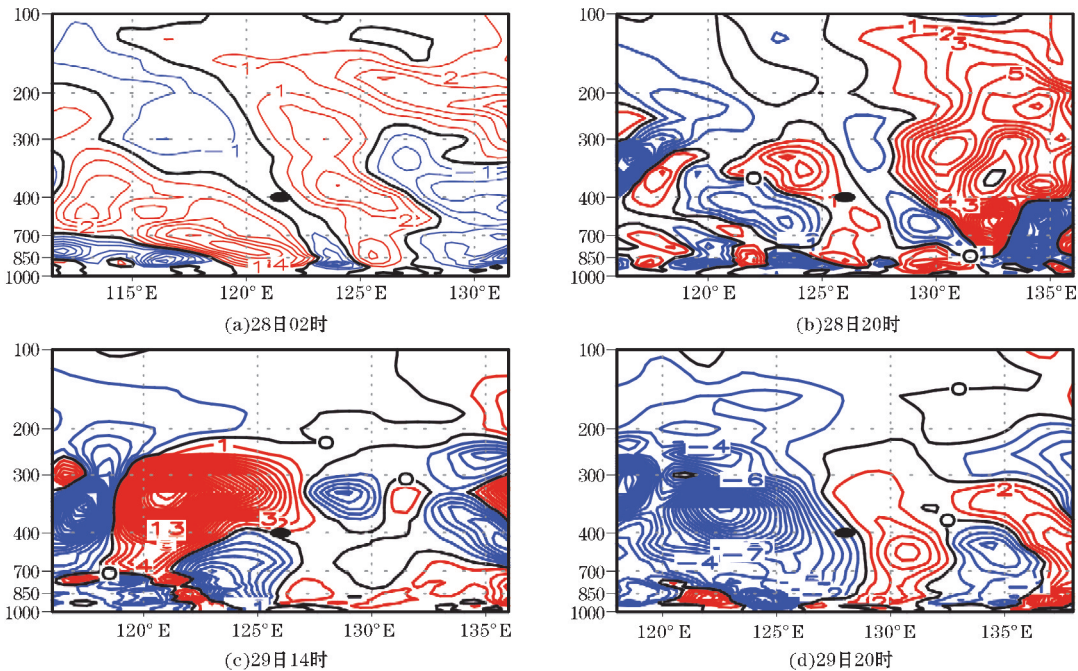


图 8 2017 年 8 月 28 日 02 时、28 日 20 时、29 日 14 时、29 日 20 时过冷涡中心的涡度平流剖面

分析冷涡发展阶段 28 日 08 时 300 K 等熵面上的气压、位涡和风场配置(图 9a)可知,高层高位涡在西北气流的引导下向东南向下入侵,至冷涡中心附近呈气旋式旋转,高位涡区主要位于冷涡的偏南侧,且随高度的增长而增大。与同时刻 300 K 等熵面上的气压、相对湿度和风场配置(图 9b)对比,发现,干侵入区与高位涡区有较好的对应,高位涡区的前沿正好对应于干侵入区的前沿,因而,干侵入也就是高位涡的入侵和下传。与此同时,冷涡槽前的西南暖湿气流也沿逆时针方向,从低层至高层倾斜旋转抬升至冷涡中心附近的

西北侧,干冷、暖湿两股气流在冷涡中心附近交汇,然而两股气流不在同一平面上,而是呈螺旋式旋转,在冷涡中心互相缠绕、形成偶极。可见,干冷空气的入侵是冷涡形成和维持冷心结构的重要因素。根据吴国雄等^[18]的下滑倾斜涡度发展理论,具有高位涡的干气流沿等熵面从高层下滑至低层的过程中,低涡中低层的垂直涡度将得到发展,即低涡增强。暖湿气流在冷涡东侧沿等熵面上滑,根据崔晓鹏等^[19]的上滑倾斜涡度发展理论,中低层低涡的垂直涡度也将发展,低涡增强。

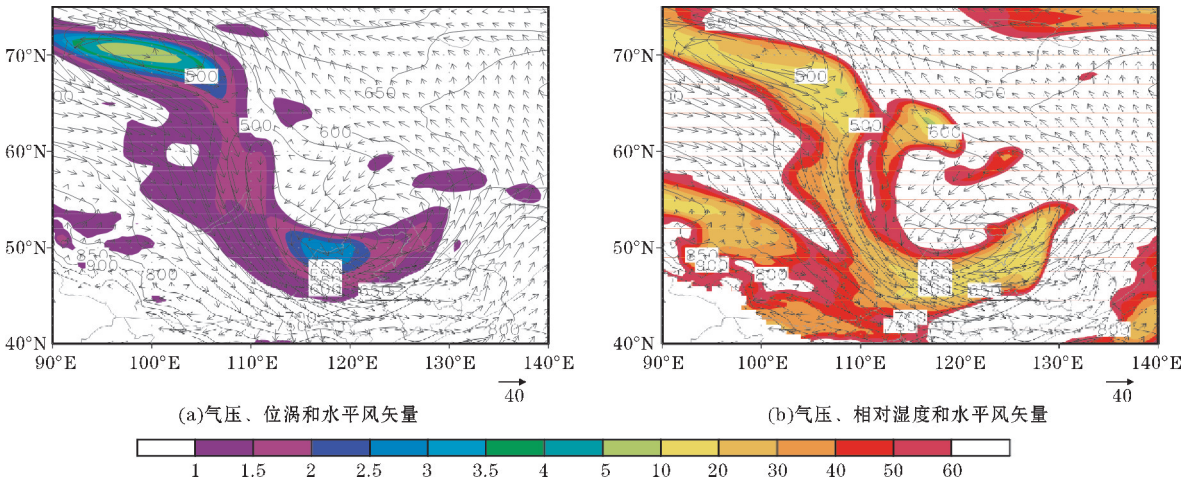


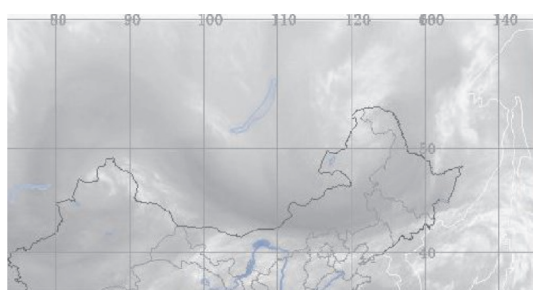
图 9 2017 年 8 月 28 日 08 时 300K 等熵面上的各要素

3.2.2 干湿特征

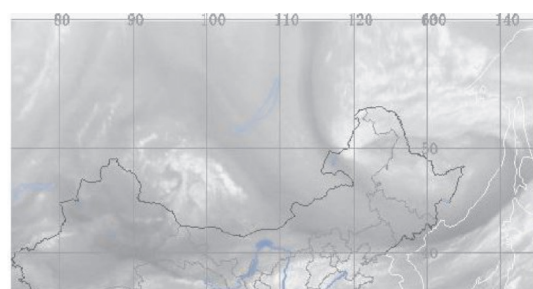
将相对湿度小于60%的部分视为干空气,分析冷涡干湿分布的垂直特征(图略),发现在冷涡发展的各个时期,均为上干下湿的不稳定层结,易引发对流不稳定天气,初中层的干空气向东倾斜明显,随冷涡的发展逐渐趋于垂直并减弱。从500 hPa水平分布上可以看出(图略),干空气从离冷涡较远的西北侧经冷涡南侧伸展到冷涡中心的东侧,同时湿空气从离冷涡较远的西南侧经冷涡东侧伸展到冷涡中心的西侧,干湿空气均呈气旋式弯曲被卷入到冷涡环流内,形成偶极。中前期这种表现较为明显,后期略凌乱。低层干空气的分布和演变特征与中层较为相似,只是低层的干区较弱,且中层干区比低层伸展的略偏东。

3.2.3 云系结构特征

卫星水汽云图上的干区为中等到灰黑色的区域,冷涡发展初期(图10a),离冷涡环流稍远的西北部有清晰可见的暗带经南侧被卷入到冷涡东侧,暗带颜色由深变浅,说明有西北干冷气流南下入侵冷涡。成熟期(图10b),冷涡环流西北侧的暗带沿逆时针方向经冷涡中心的东部,向西侵入冷涡中心的西侧,暗带颜色加深且边缘较清晰,说明干冷空气入侵加强,冷涡南侧白色的水汽带在干区外围气旋式伸展至冷涡北侧,已形成冷涡的涡旋云系。随着冷涡的旋转东移,至冷涡减弱期,暗带从冷涡的南侧沿逆时针至冷涡东北侧后向西南方向侵入冷涡中心,同时水汽带沿干区外围从冷涡西南侧气旋式发展至冷涡中心西侧,暗带颜色变浅,冷涡云系的边缘也变得模糊,此时入侵的干冷空气强度已减弱,冷涡强度也减弱。



(a) 28日02时



(b) 29日08时

图10 2017年8月28日02时和29日08时
FY-2F 卫星水汽云图

4 物理量场分析

4.1 热力条件

4.1.1 假相当位温

假相当位温是一个能综合反映大气湿度、压力和温度的特征量^[20-22]。沿122.5°E的假相当位温剖面图上,28日02时,冷空气南下与暖空气交汇在漠河北部形成等 θ_{se} 陡立密集带,说明此处为高空冷锋区,该密集带随高度向北倾斜,漠河低层为逆温层,有利于不稳定能量的积蓄;28日08时(图11a),东北冷涡移入漠河上空附近,等 θ_{se} 线为“漏斗”形,说明这时对流层低层的气旋性涡度明显增强,冷涡携带冷空气南下,等 θ_{se} 密集带也明显南压,且密度增大,陡峭密集区约为294~302 K,伸展高度约为550 hPa,56°N附近,750~925 hPa有一支较强的下沉气流,将高空冷锋区中的冷空气向下向南输送;28日14时,等 θ_{se} 密集带转为水平,伸展高度约为700 hPa,漠河850 hPa以下均为小于294 K的冷空气控制,54°N附近低层也形成一支向南向下的气流;28日20时,冷空气南移,强度略减弱,等 θ_{se} 密集带变稀疏;29日02时,低层冷空气加强,中层和高层有暖空气南下,等 θ_{se} 密集带加强;29日08-14时,漠河低层仍存在小于294 K的冷空气,且为不稳定层结,中层和高层的暖空气推动冷空气南移;29日14时,漠河上空形成一个高空暖锋区。此后冷空气逐渐减弱,漠河整层逐渐被较暖空气所占据。

沿120°E的假相当位温剖面图上,28日02时,冷空气逐渐南移与暖空气交汇在阿尔山上空,49°N、700 hPa附近有一个小于294 K的低值中心,其上方等值线较密集且向北倾斜,说明此处为高空冷锋区,阿尔山中低层为上冷下暖的不稳定层结;28日08时(图11b),冷空气南下加强,小于294 K的低值区域南移扩大,等 θ_{se} 密集带也加强并南移,陡峭密集区约为294~310 K,伸展高度约为400 hPa,阿尔山650 hPa以下为小于294 K的冷空气,800 hPa以上为较强的下沉气流,以下为较弱的偏北气流;28日14-20时,冷空气南移减弱,高空等 θ_{se} 密集带也南移减弱,阿尔山约900 hPa以下为小于294 K的冷空气;29日02-08时低层冷空气略增强,中层和高层冷空气略减弱。之后暖空气逐渐增强,冷空气逐渐减弱,阿尔山整层逐渐转为暖空气控制。

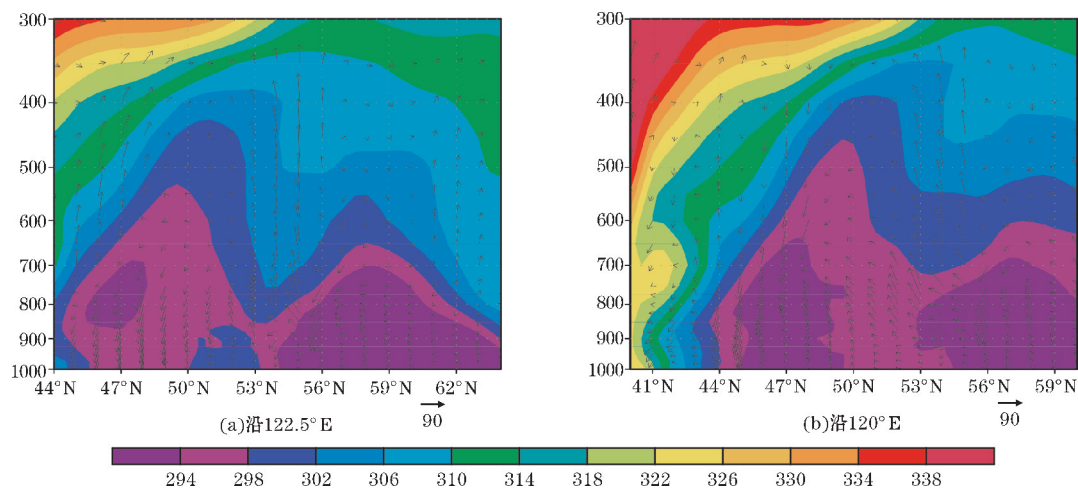


图 11 2017 年 8 月 28 日 08 时沿 122.5°E 和 120°E 的假相当位温剖面(矢量为垂直速度 $w \cdot 100$ 与 v 的合成)

4.1.2 湿位涡

湿位涡是一个能同时反映大气热力、动力和水汽状态的综合物理量,也可以表征大气的斜压稳定性和对流稳定性^[23-24]。近些年,湿位涡在暴雪^[25-27]、暴雨^[28-32]及冰雹^[33]等方面有较广泛的应用,依据其性质得到了很多重要的研究结果。

分析各时刻过漠河县的湿位涡 (P_m) 剖面 (图 12),28 日 02 时 (图 12 a、b),对流层高层的正 P_m 大值区位于漠河的西侧至南侧,西侧较远,且向东南向下发展,漠河附近及其东南部为较弱的负值区,说明有较强的冷空气从西北传来,且向下输送,漠河上空为上冷下暖的不稳定层结,有利于对流性天气的发展。28 日 08 时 (图 12c、d),漠河西北侧低层有中心大于 0.9 PVU 的 P_m 大值区自上而下向东南倾斜,中心值位于 122°E、54.5°N、850 hPa 附近,说明高层的冷空气已下传至漠河西北侧的低层,且向东南向下入侵。28 日 14 时,漠河低层的正 P_m 大值区增强且略向东南移动,之后减弱,至 29 日 08 时 (图 12e、f) 再次增强,30

日 02 时之后减弱。可见,28 日 08 时和 29 日 08 时漠河低层的正 P_m 值明显增强,即对流层低层有较强的冷空气输送,是漠河在 28 日和 29 日上午雨转雪的重要原因。

分析各时刻过阿尔山市的湿位涡 (P_m) 剖面 (图 13),28 日 02 时 (图 13 a、b),阿尔山约 800 hPa 以下为中心 <-0.1 PVU 的 P_m 负值区,正 P_m 大值中心位于阿尔山对流层高层西北部。28 日 08 时 (图 13c、d),高层的大值区向东南向下伸展呈“漏斗”形,阿尔山整层均为正值,说明西北高层较强的冷空气向下向东南传播,阿尔山低层由弱暖空气转为弱冷空气。28 日 14 时,阿尔山高层正 P_m 大值区增强并东南移,低层仍为较小的正值。此后阿尔山高层的 P_m 正值中心逐渐减弱东移,低层一直维持较小的正值。30 日 02-08 时,阿尔山低层的正 P_m 值增强,之后减弱。31 日 14 时,阿尔山低层为中心 <-0.2 PVU 的 P_m 负值区,且绝对值逐渐增大。可见,对流层低层的 P_m 值由负转正,即低层南下的冷空气是阿尔山在 28 日上午产生降雪的重要原因。

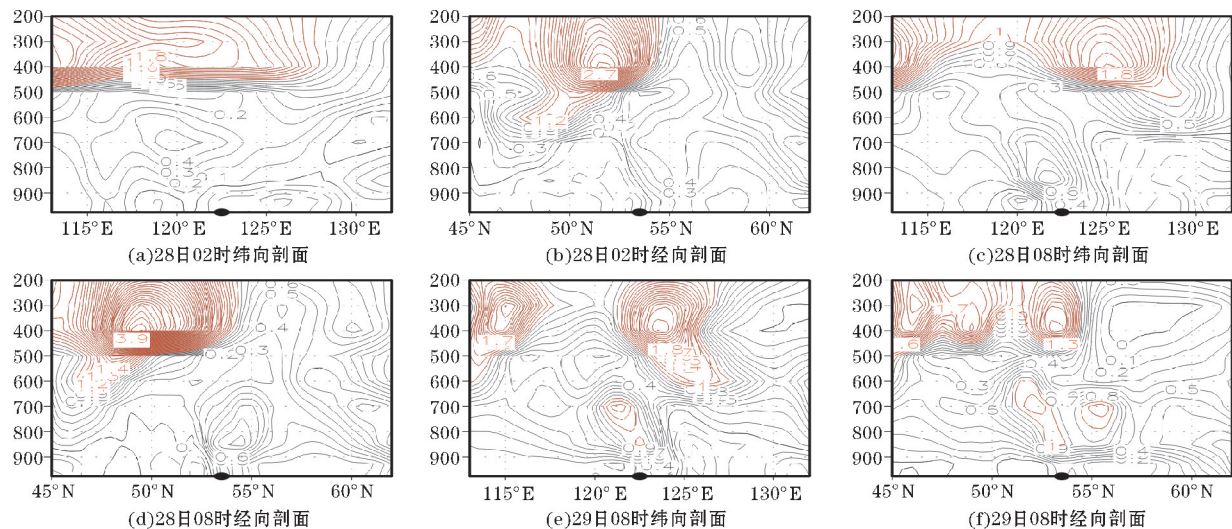


图 12 2017 年 8 月 28 日 02 时、28 日 08 时、29 日 08 时过漠河县的湿位涡剖面(红线 ≥ 1 PVU,短虚线为负值,黑圆点为漠河县的位置)

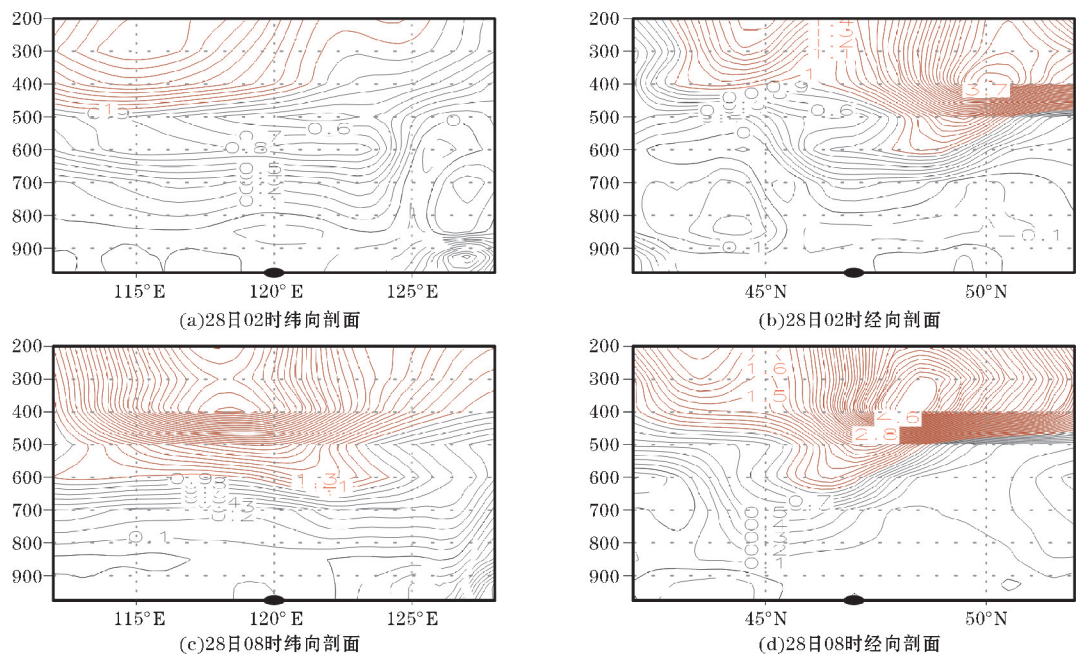


图 13 2017 年 8 月 28 日 02 时、28 日 08 时过阿尔山市的湿位涡剖面(红线 ≥ 1 PVU,短虚线为负值,黑圆点为阿尔山市的位置)

4.1.3 温度变化

分析漠河、阿尔山降雪前后 850 hPa 温度场 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 线的变化(图略),发现 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 线向东南方向移动,28 日 08 时之前经过了漠河、阿尔山两地,两地的 850 hPa 温度由正转负。从漠河县、阿尔山市的温度时间剖面图上看(图 14),漠河低层在 27 日 14 时前后有短时的升温,28 日明显降温且持续到 29 日,30 日之后温度明显升高。漠河高空 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层在 27 日之后持续下降,28 日 08–14 时降温陡度增大,之后有小幅度的抬升,但仍维持

在 900 hPa 附近,29 日 14 时之后有明显的抬升,30 日之后已抬升至 750 hPa 以上。阿尔山在 27 日 00 时前后低层温度有较明显的升高,在 28 日 08 时之前降温陡度较大,之后整体呈上升趋势。阿尔山高空 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层在 27 日 08 时之后持续下降且陡度较大,到 28 日 08 时下降至约 865 hPa,之后有小幅波动,但仍维持在 850 hPa 附近,29 日 08 时之后逐渐抬升。可见,漠河、阿尔山对流层低层温度在 28 日急剧下降是两地过早 在 8 月产生降雪的重要原因。

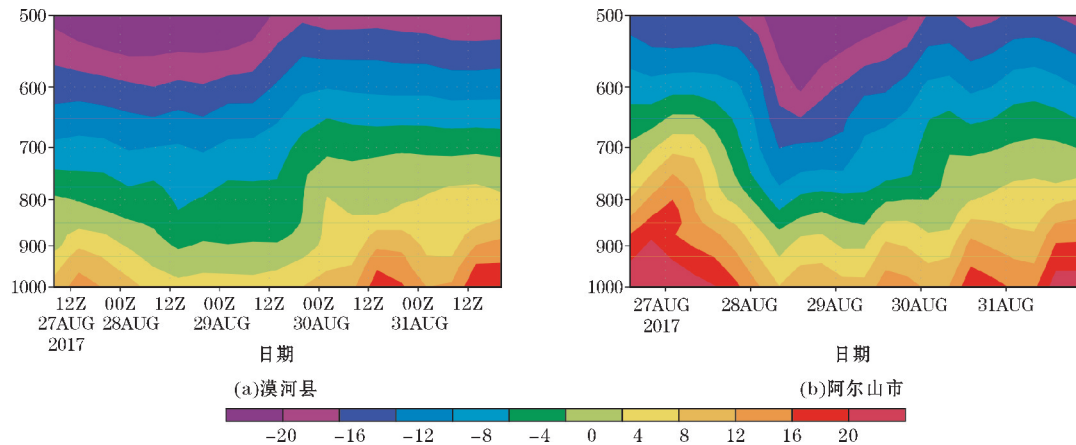


图 14 2017 年 8 月 27–30 日漠河县、阿尔山市的温度时间剖面

4.2 水汽条件

分析各时刻 850 hPa 水汽通量和水汽通量散度

(图略),发现西南气流携水汽沿冷涡外围输送,后转为偏东气流输送至冷涡内部,冷涡四周均有水汽辐合,但辐合大值区主要位于冷涡的东侧。水汽通量散度小

于 $-2 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽辐合带与冷涡外围的低空急流和假相当位温密集带有较好的对应,从冷涡的南侧沿逆时针发展到冷涡的北侧,这些区域的水汽和能量均较充沛,因此对流发展比较旺盛。

分析各时刻整层水汽通量(图15),28日02时,水汽通量大值区呈NE-SW向,中心值大于 $800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 位于辽宁与朝鲜交界处,降水落区主要位于东北东部,与水汽大值区对应较好;28日14时(图15a),水汽大值区随冷涡东移至黄海到日本海一带,水汽沿冷涡外围逆时针方向输送,东北东部降水减弱,北部维持少量降水,

漠河的水汽通量达 $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,阿尔山的水汽通量达 $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上;29日02时,水汽大值区继续随冷涡东移,主要位于日本附近,中国东北的水汽值含量较低,不超过 $300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,仅北部有少量降水;29日14时(图15b),水汽大值区东移至日本东部,135°E、55°N附近有一个大于 $600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽中心,水汽经日本东部的西北太平洋和鄂霍次克海沿逆时针输送,东北北部的降水量略增加。此后随着冷涡的东移,东北地区仅北部有少量降水且降水落区逐渐东移减少。

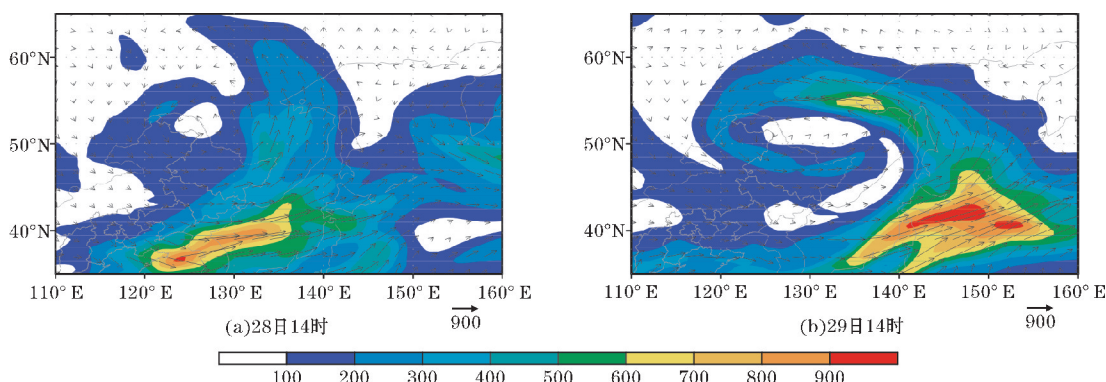


图15 2017年8月28日14时和29日14时的整层水汽通量图(阴影区为 $\geq 100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

4.3 动力条件

分析各时刻过冷涡中心的垂直速度和散度的剖面(图16),发展初期(图16a、b),冷涡西侧中层有下沉气流向东传播,南侧中低层有较强的下沉气流,最大上升速度出现在冷涡的东侧至北侧。至成熟期(图16c、d),冷涡南侧低层为上升气流,中层及高层为下沉气流,东侧和北侧靠近冷涡中心存在下沉气流,外侧为上升气流,西侧主要为上升区,冷涡外围的最大上升区均位于500 hPa附近,上部为辐散大值区。减弱期(图16e、f),冷涡东侧和北侧主要为上升气流,西侧靠近冷涡中心为上升气流,外围中层为下沉气流,南侧主要为下沉气流,靠近冷涡中心的低层为上升气流。

以上分析表明,冷涡在发展过程中伴随着大范围气流的相对运动。初期,冷涡的西侧至南侧有下沉气流向冷涡中心运动,促进了冷涡的发展,冷涡的东侧和北侧则为较强的上升气流。成熟期,冷涡的西侧转为上升气流,东侧和北侧的上升气流明显增强。减弱期,冷涡东、西及北侧的上升气流减弱,南侧一直存在下沉

气流。这与前面分析的冷涡干湿两股气流运动变化的结论较为一致。

冷涡降水取决于冷涡风场的结构变化特征,漠河县在降水过程的前期和中期分别位于冷涡的东北侧和西北侧,均有较强的上升气流,后期仍位于冷涡的西北侧,仅低层为上升气流,阿尔山市一直位于冷涡的西南侧,有较强的下沉气流。分析漠河县、阿尔山市垂直速度和散度的时间剖面(图17),漠河在整个降水期间,低层均为辐合,辐合较强的时段,400 hPa附近为辐散,垂直上升运动较强,对应的降水也较强,29日00时前后,低层辐合减弱,750 hPa附近为辐散,上升运动减弱,对应的降水也减弱,降水后期,低层辐合减弱维持在900 hPa附近,辐散在750 hPa附近,上升运动较弱且维持在低层,700 hPa以上转为下沉运动,降水趋于停滞。阿尔山400 hPa附近为辐合,800 hPa附近为辐散,高空主要为下沉运动,不利于产生降水,低层925 hPa附近为辐合有弱上升运动,28日上午低层辐合及上升运动增强,配合水汽条件,产生了少量的降水。

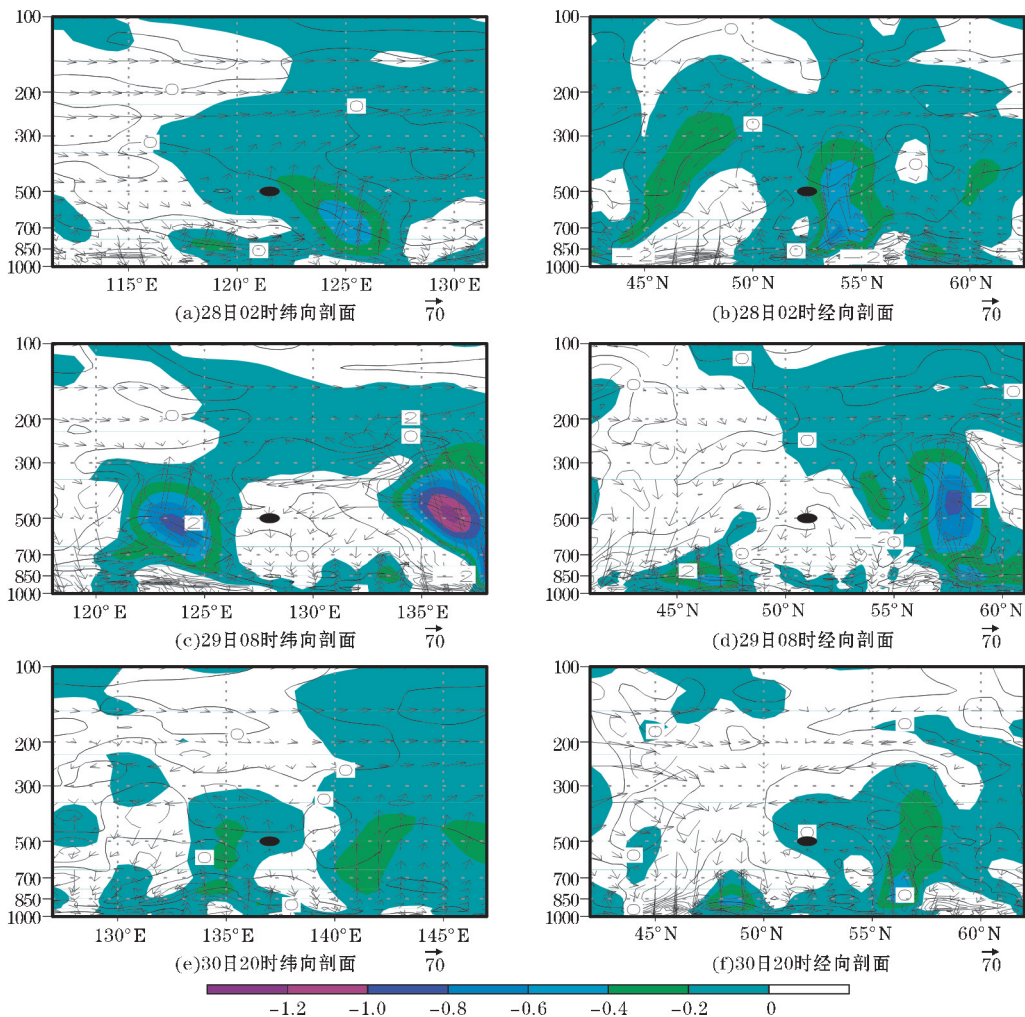


图 16 2017 年 8 月 28 日 02 时,29 日 08 时,30 日 20 时过冷涡中心的散度(等值线,短虚线为负值)和垂直速度(填色为上升区)以及垂直风场(矢量, $w \cdot 100$ 与 u 或 v 的合成)的剖面

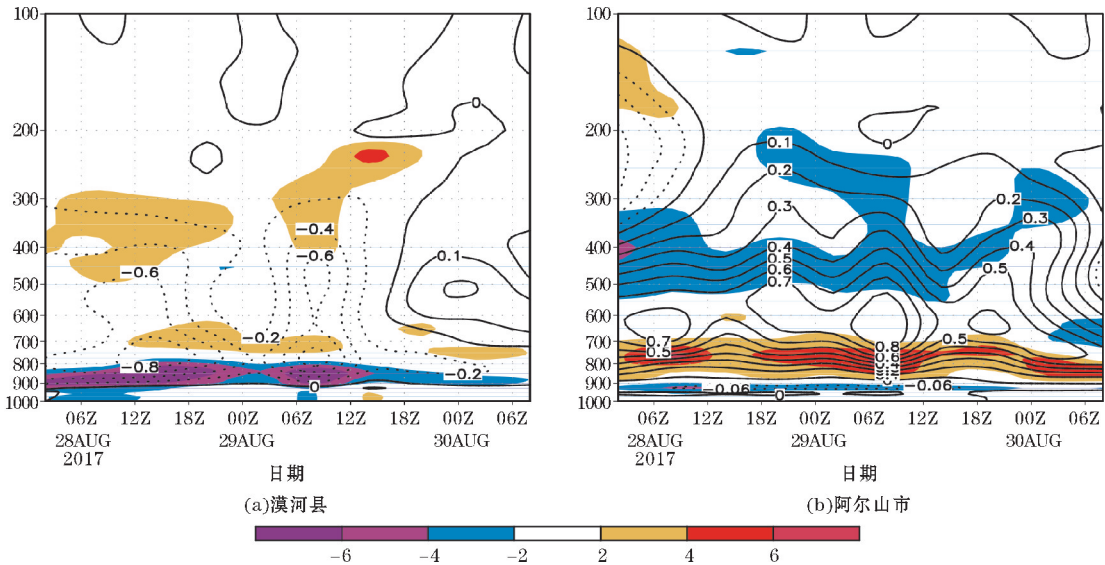


图 17 2017 年 8 月 28-30 日漠河县、阿尔山市的散度(阴影)与垂直速度(等值线)的时间剖面

5 结论

(1) 东北冷涡是这次雨雪降温过程的主要影响系

统,在冷涡东移的过程中槽后西北气流引导来自西伯利亚的冷空气南下,且伴有大风,导致东北大部分地区明显降温。随着冷涡的减弱东移,东北地区的温度逐渐回暖。

(2)在冷涡的发展过程中,冷暖平流呈气旋式旋转,槽前冷平流是促进低层冷涡发展的主要因子。冷涡是一个正涡度系统,最大涡度中心位于对流层高层,中高层槽前的正涡度平流对冷涡的发展有着重要作用。

(3)高层高位涡在西北气流的引导下向东南向下入侵,至冷涡中心附近呈气旋式旋转,干侵入也就是高位涡的入侵和下传。同时,冷涡槽前的西南暖湿气流也沿逆时针方向,从低层至高层倾斜旋转抬升至冷涡中心附近的西北侧,干冷、暖湿两股气流在冷涡中心互相缠绕、形成偶极。干冷空气的入侵是冷涡形成和维持冷心结构的重要因素。

(4)冷空气南下与暖空气交汇形成等 θ_{se} 陡立密集带,即高空冷锋区,随高度向北倾斜,并逐渐南移。西北高层较强的冷空气向东南向下传播,漠河、阿尔山对流层低层有南下的冷空气输送,低层温度在28日急剧下降是两地过早在8月产生降雪的重要原因。

(5)水汽随冷涡环流沿逆时针方向输送,水汽辐合大值带与冷涡外围的低空急流和假相当位温密集带有较好的对应,从冷涡南侧沿逆时针发展至冷涡北侧,水汽大值区主要位于冷涡东侧,并随冷涡逐渐东移,较充沛的水汽和能量有利于对流性天气的发展,随着冷涡的东移,东北地区的降水逐渐减弱停滞。

(6)冷涡在发展过程中伴随着大范围气流的相对运动,而冷涡降水取决于冷涡风场的结构变化特征,漠河在降水过程的前期和中期分别位于冷涡的东北侧和西北侧,均有较强的上升气流,降水也较强,后期仍位于冷涡的西北侧,仅低层为上升气流,降水趋于停滞。阿尔山一直位于冷涡的西南侧,高空主要为下沉气流,不易产生降水,当低层的弱上升气流增强时,产生了少量的降水。

参考文献:

- [1] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理[M]. 3版. 北京:气象出版社,1992:372.
- [2] 朱占云,何金海. 东北冷涡的特征、影响及其可能机制的研究[J]. 气象与减灾研究,2010,33(4):1-8.
- [3] 郑秀雅,张廷治,白人海. 东北暴雨[M]. 北京:气象出版社,1992:129-137.
- [4] 孙力,安刚,廉毅,等. 夏季东北冷涡持续性活动及其大气环流异常特征的分析[J]. 气象学报,2000(6):704-714.
- [5] 李永生,朱玉祥,王莹. 影响黑龙江夏季气温的大尺度环流因子分析[J]. 气象科技进展,2015,5(1):48-52.
- [6] 李辑,焦敏,胡春丽,等. 1951-2012年东北地区夏季气温及其影响因子变化特征[J]. 气象与环境学报,2016,32(5):74-83.
- [7] 胡开喜,陆日宇,王东海. 东北冷涡及其气候影响[J]. 大气科学,2011,35(1):179-191.
- [8] 王宝书,张瑛. 2010年7月27-29日吉林省大范围强降水过程分析[J]. 暴雨灾害,2011,30(1):36-43.
- [9] 王蕾,张舒. 黑龙江省春季强降温天气分析与服务[J]. 黑龙江气象,2016,33(4):24-27.
- [10] 董林,符娇兰,宗志平. 2011年隆冬北京初雪成因分析[J]. 气象,2012,38(8):913-920.
- [11] 李晓霞,樊晓春,李奇三,等. 2014年春季甘肃河东地区一次大范围雨雪降温天气过程分析[J]. 干旱气象,2016,34(2):317-325.
- [12] 杨贵名,毛冬艳,孔期. “低温雨雪冰冻”天气过程锋区特征分析[J]. 气象学报,2009,67(4):652-665.
- [13] 许彤,田丰. 桃仙机场雷雨转雨夹雪天气的分析[J]. 广西气象,2006,27(4):34-36.
- [14] 孙力,郑秀雅,王琪. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的关系[J]. 应用气象学报,1994,5(3):297-303.
- [15] Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1985, 111: 877-946.
- [16] 刘英,王东海,张中锋,等. 东北冷涡的结构及其演变特征的个例综合分析[J]. 气象学报,2012,70(3):354-370.
- [17] 吴迪,姚秀萍,寿绍文. 干侵入对一次东北冷涡过程的作用分析[J]. 高原气象,2010,29(5):1208-1217.
- [18] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报,1995(4):387-405.
- [19] 崔晓鹏,吴国雄,高守亭. 西大西洋锋面气旋过程的数值模拟和等熵分析[J]. 气象学报,2002(4):385-399.
- [20] 刘家峻,刘睿卉,李荔珊,等. 一次海南大暴雨过程的能量及螺旋度分布特征[J]. 气象与环境科学,2011,34(1):36-41.
- [21] 冉令坤,楚艳丽. 强降水过程中垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式的诊断分析[J]. 物理

- 学报,2009,58(11):8094-8106.
- [22] 吴迪,寿绍文,姚秀萍. 东北冷涡暴雨过程中干侵入特征及其与降水落区的关系[J]. 暴雨灾害,2010,29(2):111-116.
- [23] 夏冠聪,寿绍文. 一次梅雨锋暴雨的数值模拟及位涡诊断[J]. 南京气象学院学报,2007(4):538-545.
- [24] 王苗,郭品文,邬昀. 中国东部极端降水变化特征及其与大气稳定度的关系[J]. 大气科学学报,2014,37(1):47-56.
- [25] 艾丽华,井喜,王淑云,等. 湿位涡诊断在青藏高原东北侧暴雪预报中的应用个例[J]. 气象科学,2008,28(S1):92-96.
- [26] 马新荣,任余龙,丁治英. 青藏高原东北侧一次暴雪过程的湿位涡分析[J]. 干旱气象,2008(1):57-63.
- [27] 赵桂香,程麟生,李新生. “04.12”华北大到暴雪过程切变线的动力诊断[J]. 高原气象,2007(3):615-623.
- [28] 于玉斌,姚秀萍. 对华北一次特大台风暴雨过程的位涡诊断分析[J]. 高原气象,2000(1):111-120.
- [29] 范可,琚建华. 位涡诊断在云南夏季强降水预报中的应用[J]. 高原气象,2004(3):387-393.
- [30] 段旭,李英. 滇中暴雨的湿位涡诊断分析[J]. 高原气象,2000(2):253-259.
- [31] 任余龙,寿绍文,李耀辉. 西北区东部一次大暴雨过程的湿位涡诊断与数值模拟[J]. 高原气象,2007(2):344-352.
- [32] 张冰,胡隐樵,傅培健. “03.7”梅雨锋暴雨的中尺度模拟和诊断分析[J]. 高原气象,2005(3):378-386.
- [33] 李英,段旭. 湿位涡在云南冰雹天气分析中的应用[J]. 应用气象学报,2000(2):242-248.

Diagnosis on the Process of a Rain, Snow and Cooling in Northeast China in August 2017

YU Jiahan, GONG Yuanfa

(College of Atmosphere Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: A process of large scale cooling occurred in Northeast China in August 27-31, 2017 while precipitation occurred in some areas, and the first snowfall both happened in Mohe County and Aershan City in the 28th. In order to study the cause of such as rain and snow these cooling weather, based on the routine meteorological observational data, ERA-Interim reanalysis data and the satellite images, the background of largescale circulation, the occurrence mechanism and development of the cold vortex and the configuration of physical quantity fields were diagnosed and analyzed. The results show that: the northeast cold vortex was the main influential system of the cooling process of rain, snow. The invasion of dry and cold air was an important factor for the formation of cold vortex and the maintenance of cold structure. During the process of cold air in high latitude flowing down the cold vortex, there was a cold frontal zone in high-altitude that gradually moved southward, the sharp drop of low-level temperature was an important cause of snowfall. The water vapor was transported counterclockwise along the cold vortex circulation, the large value zone was mainly located on the east side of the cold vortex, and moved eastward with the cold vortex. The precipitation associated with the cold vortex depended on the structural variation characteristics of the cold vortex wind field, when the updraft was strong, the precipitation was also strong.

Keywords: meteorology; synoptic diagnosis; northeast cold vortex; mechanism analysis; rain; snow and cooling